

УДК 550.34

РАЗЛИЧИЯ В НАКЛОНЕ ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ НЕЗАВИСИМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

© 2008 А.А. Коновалова^{1, 2}, В.А. Салтыков^{1, 2}

¹Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, 683032, Петропавловск-Камчатский, e-mail: KononovAnna@mail.ru

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский

В работе выясняется необходимость удаления афтершоковых последовательностей из единого каталога землетрясений при расчете наклона графика повторяемости γ , как одного из параметров сейсмического режима. Расчеты γ проводились для всех землетрясений из каталога ($\gamma_{\text{весь}}$), для группированных землетрясений (а именно, афтершоков) – $\gamma_{\text{афт}}$ и для фоновых событий ($\gamma_{\text{фон}}$) в выделенных пространственных зонах афтершоковых последовательностей. Для сравнения полученных величин ($\gamma_{\text{афт}}$ с $\gamma_{\text{фон}}$, $\gamma_{\text{весь}}$ с $\gamma_{\text{фон}}$ и $\gamma_{\text{весь}}$ с $\gamma_{\text{афт}}$) проведен статистический анализ с использованием параметра Z (разность значений, нормированная на ее среднеквадратичное отклонение) и критерия Колмогорова-Смирнова. В результате анализа распределения параметра Z получено статистически значимое различие рассматриваемых величин. Полученные уровни значимости обосновывают необходимость удаления афтершоковых последовательностей из каталога при расчете параметра γ .

ВВЕДЕНИЕ

График повторяемости землетрясений характеризует распределение количества землетрясений по энергии. Линейное соотношение, характеризующее повторяемость землетрясений, обычно записывается в форме закона Гутенберга-Рихтера (Gutenberg, Richter, 1954) в интегральной или дифференциальной форме:

$$\lg N = a - bM,$$

$$\text{или} \quad \lg \left(\frac{\Delta N}{\Delta M} \right) = a_1 - bM,$$

где N – число землетрясений с магнитудой M и более, ΔN – число землетрясений в интервале магнитуд ΔM , a и b – эмпирически определяемые коэффициенты. При использовании в качестве параметра землетрясения энергетического класса K вместо магнитуды M линейность графика повторяемости сохраняется, изменяются лишь величины коэффициентов:

$$\lg N = a - \gamma K.$$

Сейсмическая активность a и наклон b (или γ при использовании энергетического класса K) являются одними из основных параметров сейсмического режима.

В выборе способа построения графика повторяемости предпочтение отдается кумулятивному графику (рис.1), поскольку этот вариант лишен недостатков, свойственных гистограммам (в частности, произвола в выборе интервалов разбиения). При расчете величины γ используется лишь предположение об экспоненциальном типе распределения землетрясений по энергиям. Таким образом, рассматривается все множество энергетических классов $\{K_i\}$. Существенную роль играет значение нижнего порога $\{K_i\}$ – K_0 , что соответствует уровню надежной регистрации землетрясений. Рассматривая более слабые землетрясения (с $K < K_0$, т.е. за пределом линейного участка

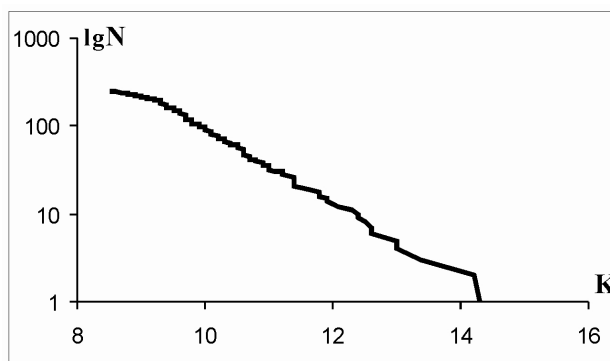


Рис.1. Пример кумулятивного графика повторяемости.

графика повторяемости) могут быть получены неверные значения γ .

В последние 25 лет разрабатываются методики среднесрочного прогнозирования сильных землетрясений, основанные на мониторинге величины наклона графика повторяемости (Завьялов, 2006; Моги, 1988). Отмечено, что перед сильным землетрясением она статистически значимо изменяется. Поэтому актуален вопрос о точности расчетов параметра γ при решении конкретных задач.

Так как сейсмический процесс включает в себя как независимые, так и группированные землетрясения (афтершоки, рои), то вопрос о правомерности использования значения γ , полученного по всем землетрясениям, для характеристики фоновой сейсмичности требует прояснения. Исходя из общих соображений, афтершоковый процесс отражает релаксацию среды после сильного землетрясения, поэтому он обладает характеристиками, отличными от характеристик фоновой сейсмичности, как и рои землетрясений. Это объясняет то, что в настоящее время перед расчетом параметра γ из каталога удаляются афтершоковые последовательности.

Проверка необходимости удаления афтершоковых последовательностей из каталога перед использованием его для расчетов параметра γ является целью данной работы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовался каталог землетрясений Камчатского филиала Геофизической Службы РАН (<http://www.emsd.ru>) за период с 1962 по 2006 год. Для данного каталога в целом представительным классом является $K = 8.5$ (Гордеев, Чебров и др., 2004).

Полный каталог был разделен на каталог афтершоковых последовательностей и каталог независимых землетрясений (т.е. каталог, очищенный от афтершоков). Каталог независимых землетрясений характеризует фоновую сейсмичность. Выделение афтершоковых групп из каталога осуществлялось по методике Молчан-Дмитриевой (Молчан, Дмитриева, 1991) с использованием программы, составленной и любезно предоставленной к. ф.-м. н., доцентом МГУ им. Ломоносова В. Б. Смирновым.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наклон графика повторяемости рассчитывался по методу наибольшего правдоподобия, исходя из экспоненциального распределения землетрясений по энергетическому классу K . При этом применялась формула (Аки, 1965), с поправкой на использование энергетического класса K вместо магнитуды M :

$$\gamma = \log_{10} e \cdot \frac{1}{\sum_i \frac{K_i}{N} - K_0},$$

где N — число всех сейсмических событий в выбранной для расчета области пространства-времени-энергии, K_i — энергетический класс землетрясения $K_s^{\Phi 68}$ (Федотов, 1972), K_0 — минимальный энергетический класс, соответствующий нижнему уровню надежной регистрации землетрясений.

Среднеквадратичная ошибка определения γ рассчитывалась по формуле (Куллдорф, 1966):

$$\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}.$$

Так как число землетрясений в каждой афтершоковой последовательности различно, то различны и относительные ошибки определения γ . Расчеты проводились в трех вариантах. Для каждого из них был зафиксирован свой максимальный уровень относительной ошибки определения $\gamma - \delta_\gamma$:

$$\delta_\gamma = \frac{\sigma_\gamma}{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{N}} \leq 0.1, 0.14 \text{ и } 0.2 \text{ соответственно.}$$

Таким образом, были определены три уровня минимального числа афтершоков в последовательностях, используемых при расчете γ — $N = 100$, $N = 50$ и $N = 25$. Из каталога афтершоковых последовательностей выделены: 21 последовательность, где количество афтершоков превышало установленный порог 100; 43 последовательности — с $N \geq 50$ и 85 — с $N \geq 25$. Кроме этого были заданы следующие условия выборки: диапазон глубин землетрясений — от 0 до 100 км; диапазон энергетических классов — от 8.5 до 16. Для некоторых зон афтершоковых последовательностей минимальный класс надежной регистрации землетрясений, определенный по прямолинейному участку кумулятивного графика повторяемости, оказался больше уровня надежной регистрации рассматриваемого сейсмоактивного района в целом, то есть $K_{min} > 8.5$. Такие афтершоковые последовательности рассматривались с учетом K_{min} , соответствующих этим зонам (а именно, 21.06.1996 г. — $K_{min} = 9.5$ и 08.10.2001 г. — $K_{min} = 9.0$), в таблицах отмечены (*). В табл. 1. представлены в качестве примера данные афтершоковых последовательностей для выборки $N \geq 100$.

Для каждой афтершоковой последовательности была оценена пространственная область как 2σ -эллипс рассеяния эпицентров согласно двумерному распределению Гаусса (табл. 2). При нормальном распределении в такой эллипс должно попадать $\approx 95\%$ событий.

Далее для каждой афтершоковой области, аппроксимированной эллипсом, производилась

Таблица 1. Параметры землетрясений и их афтершоковых последовательностей.

Дата	Время (ч, мин., с)			M_s	$K_s^{\Phi 68}$	φ , град.с.ш.	λ , град.в.д.	H , км	$N_{aфm}$	T , сут.
21.01.1969	23	12	7.8		12.3	55.85	163.26	5	215	282.5
22.11.1969	23	9	31.5	7.7	15.3	57.93	164.00	40	283	1793.6
15.12.1971	8	29	55.0		15.4	55.97	163.35	20	670	567.1
28.02.1973	6	37	49.4	7.5	15.1	49.97	157.06	59	250	460.1
02.07.1975	7	34	19.5		11.3	55.65	160.20	18	108	445.6
06.01.1976	22	17	43.1	6.2	13.7	51.36	159.69	5	235	1042.1
02.03.1978	14	34	56.7	5.7	13.2	55.07	164.79	42	145	672.1
23.01.1980	2	34	10.4	6.0	13.7	52.22	160.36	14	220	190.0
13.03.1983	10	6	10.4	4.6	12.0	52.34	157.82	0	133	579.2
17.08.1983	10	55	55.5	6.8	15.4	55.64	161.53	97	191	1697.4
28.12.1984	10	37	53.6	7.5	14.0	56.18	163.45	19	136	460.4
02.03.1992	12	29	38.5	7.1	14.6	52.76	160.20	20	139	667.9
08.06.1993	13	3	37.0	7.4	15.0	51.20	157.80	40	258	447.2
01.01.1996	9	57	45.8	7.0	14.3	53.88	159.44	0	441	999.5
21.06.1996*	13	57	5.6	7.3	13.9	51.27	159.63	2	246	1002.8
05.12.1997	11	26	51.0	7.9	15.5	54.64	162.55	10	1642	532.4
26.11.1999	15	57	33.8	5.6	13.4	55.06	165.51	36	178	997.9
08.10.2001*	18	20	37.5	6.6	14.1	52.63	160.49	24	140	595.5
15.03.2003	19	41	24.3	5.8	13.3	52.15	160.66	4	110	965.2
05.12.2003	21	26	14.1	6.8	14.8	55.78	165.43	29	124	1049.6
20.04.2006	23	24	55.5		15.0	61.06	167.58	4	149	183.5

Примечание: Дата – дата землетрясения, имеющего афтершоки; φ , град.с.ш. и λ , град.в.д. – широта и долгота землетрясения; M_s и $K_s^{\Phi 68}$ – магнитуда (по каталогу ГС РАН, г. Обнинск) и энергетический класс; H , км – глубина гипоцентра; $N_{aфm}$ – количество афтершоков в последовательности; T , сут. – длительность афтершоковой последовательности в сутках; * отмечены афтершоковые последовательности, в области которых уровень надежной регистрации составляет $K > 8.5$.

Таблица 2. Параметры выделенных областей для афтершоковых последовательностей.

Дата	Время (ч, мин., с)			a , км	b , км	θ , град.	Координаты центра эллипса, град.	
							φ	λ
21.01.1969	23	12	7.8	22.4	16.0	56.47	55.83	163.32
22.11.1969	23	9	31.5	78.0	50.6	18.68	57.26	163.54
15.12.1971	8	29	55	77.4	52.8	-65.53	55.77	163.51
28.02.1973	6	37	49.4	65.6	36.8	26.70	50.29	157.16
02.07.1975	7	34	19.5	15.6	8.6	42.89	55.71	160.31
06.01.1976	22	17	43.1	39.6	26.6	-46.10	51.45	159.58
02.03.1978	14	34	56.7	19.6	14.0	-88.49	54.94	164.73
23.01.1980	2	34	10.4	25.4	23.4	-23.57	52.25	160.51
13.03.1983	10	6	10.4	6.2	4.4	-3.25	52.32	157.92
17.08.1983	10	55	55.5	20.0	10.8	-23.83	55.57	161.81
28.12.1984	10	37	53.6	27.6	17.6	70.15	56.20	163.60
02.03.1992	12	29	38.5	17.8	12.8	56.70	52.84	160.03
08.06.1993	13	3	37	67.4	35.6	26.20	51.23	158.41
01.01.1996	9	57	45.8	17.0	8.6	41.17	53.88	159.40
21.06.1996*	13	57	5.6	38.8	23.8	87.94	51.43	159.77
05.12.1997	11	26	51	108.6	54.4	33.15	54.18	162.00
26.11.1999	15	57	33.8	20.2	12.0	-24.75	55.04	165.63
08.10.2001*	18	20	37.5	36.4	14.8	-41.26	52.60	160.49
15.03.2003	19	41	24.3	14.4	13.2	-41.40	52.26	160.60
05.12.2003	21	26	14.1	31.6	12.4	-6.64	55.65	165.72
20.04.2006	23	24	55.5	82.6	44.2	54.64	60.95	167.02

Примечание: a , км и b , км – большая и малая полуоси эллипса; θ , град. – угол между направлением на восток и большей полуосью эллипса, измеряемый против часовой стрелки; φ и λ – координаты центра эллипса (градусы); * отмечены афтершоковые последовательности, в области которых уровень надежной регистрации составляет $K > 8.5$.

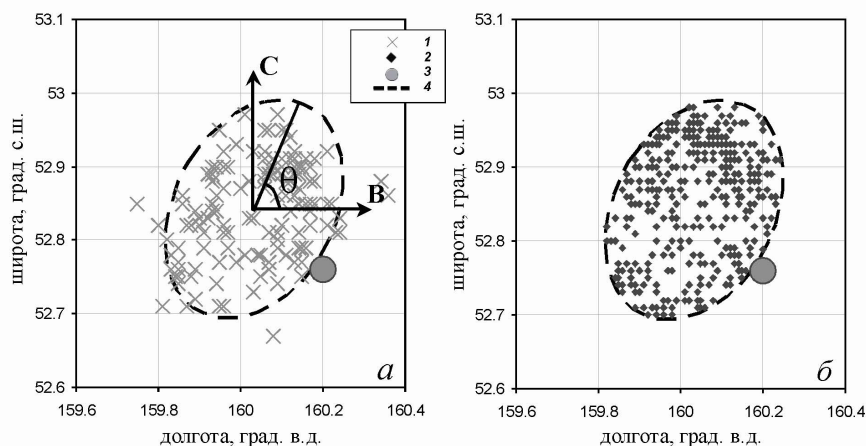


Рис. 2. Диаграмма области рассеяния афтершоков (а) и распределения в ее пределах независимых событий (б). 1, 2 - эпицентры афтершоков и фоновых событий; 3 - эпицентр главного события; 4 - область афтершоковой последовательности. Стрелками указаны восточное (В) и северное (С) направления.

выборка независимых событий, эпицентры которых попали в нее за время детальных сейсмологических наблюдений.

Эпицентры афтершоков, их область рассеяния в пространстве, а также выделенные для этой области фоновые землетрясения на примере одной афтершоковой последовательности (02.03.1992, $K = 14.6$) показаны на рис. 2.

Дальнейший анализ проводился в пределах областей афтершоковых последовательностей.

На схеме (рис. 3) представлено пространственное расположение эпицентров главных событий, афтершоков, а также выделенных областей афтершоковых последовательностей, главные события которых имели $K \geq 15.0$.

Рассчитывались значения наклонов графика повторяемости для всех афтершоковых последовательностей (γ_{aft}), а также для выделенных в их областях землетрясений из полного каталога ($\gamma_{весь}$) и фоновых событий ($\gamma_{фон}$) по приведенным выше формулам. Полученные значения наклонов графика повторяемости γ и их среднеквадратичные ошибки γ_z приведены в табл. 3.

В некоторых областях афтершоковых последовательностей выделены фоновые события, количество которых недостаточно по заданным условиям выборки ($N \geq 100$), которое обязательно не только для афтершоков, но и для независимых событий (т.е. афтершоки происходили в области очень низкой фоновой сейсмичности). В результате, пять афтершоковых последовательностей (даты их главных событий окрашены серым цветом в табл. 3) не использовались в дальнейших расчетах.

По аналогичным причинам для выборок $N \geq 50$ и $N \geq 25$ в расчетах участвовали только 39 и 80 последовательностей соответственно.

Для сравнения величин наклонов графика повторяемости афтершоков, фона и событий всего каталога, в пределах одной пространственной области, использовался параметр Z - разность $\Delta\gamma = (\gamma_{aft} - \gamma_{фон})$, нормированная на среднеква-

дратичную ошибку ее определения:

$$Z = \frac{(\gamma_{aft} - \gamma_{фон})}{\sqrt{\sigma_{\gamma_{aft}}^2 + \sigma_{\gamma_{фон}}^2}}$$

(Смирнов, Дунин-Барковский, 1969).

Полученные значения сведены в таблицу 4,

где $\Delta\gamma = (\gamma_{aft} - \gamma_{фон})$, $\sigma_{\Delta\gamma} = \sqrt{\sigma_{\gamma_{aft}}^2 + \sigma_{\gamma_{фон}}^2}$ и

$$Z = \frac{\Delta\gamma}{\sigma_{\Delta\gamma}}.$$

Аналогичные вычисления проведены для пар $(\gamma_{весь}, \gamma_{фон})$ и $(\gamma_{весь}, \gamma_{aft})$.

Отметим, что полученные значения параметра Z находятся в широком диапазоне (табл. 4). Для анализа распределения величин Z проведен дополнительный статистический анализ.

За нулевую гипотезу H_0 принята гипотеза о равенстве наклонов графика повторяемости афтершоковых последовательностей γ_{aft} и фоновых событий $\gamma_{фон}$: $\gamma_{фон} = \gamma_{фон}$. Аналогично для событий всего каталога и фона ($\gamma_{весь} = \gamma_{фон}$), а также для всего каталога и афтершоков ($\gamma_{весь} = \gamma_{aft}$), в областях соответствующих афтершоковых последовательностей. В этом случае параметр Z должен иметь нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией $N(0, 1)$.

Для проверки нулевой гипотезы использовался критерий Колмогорова-Смирнова (Кобзарь, 2006). Критерий основан на сравнении эмпирической функции распределения Z с теоретической функцией нормального распределения $N(0, 1)$ (Смирнов, Дунин-Барковский, 1969). Для построения эмпирической функции распределения использовалась формула:

$$F(Z) = \frac{n_Z}{n},$$

где n_Z - число наблюдаемых значений Z , меньших Z , n - объем выборки Z .

В соответствии с условиями применения данного критерия построены теоретическая и

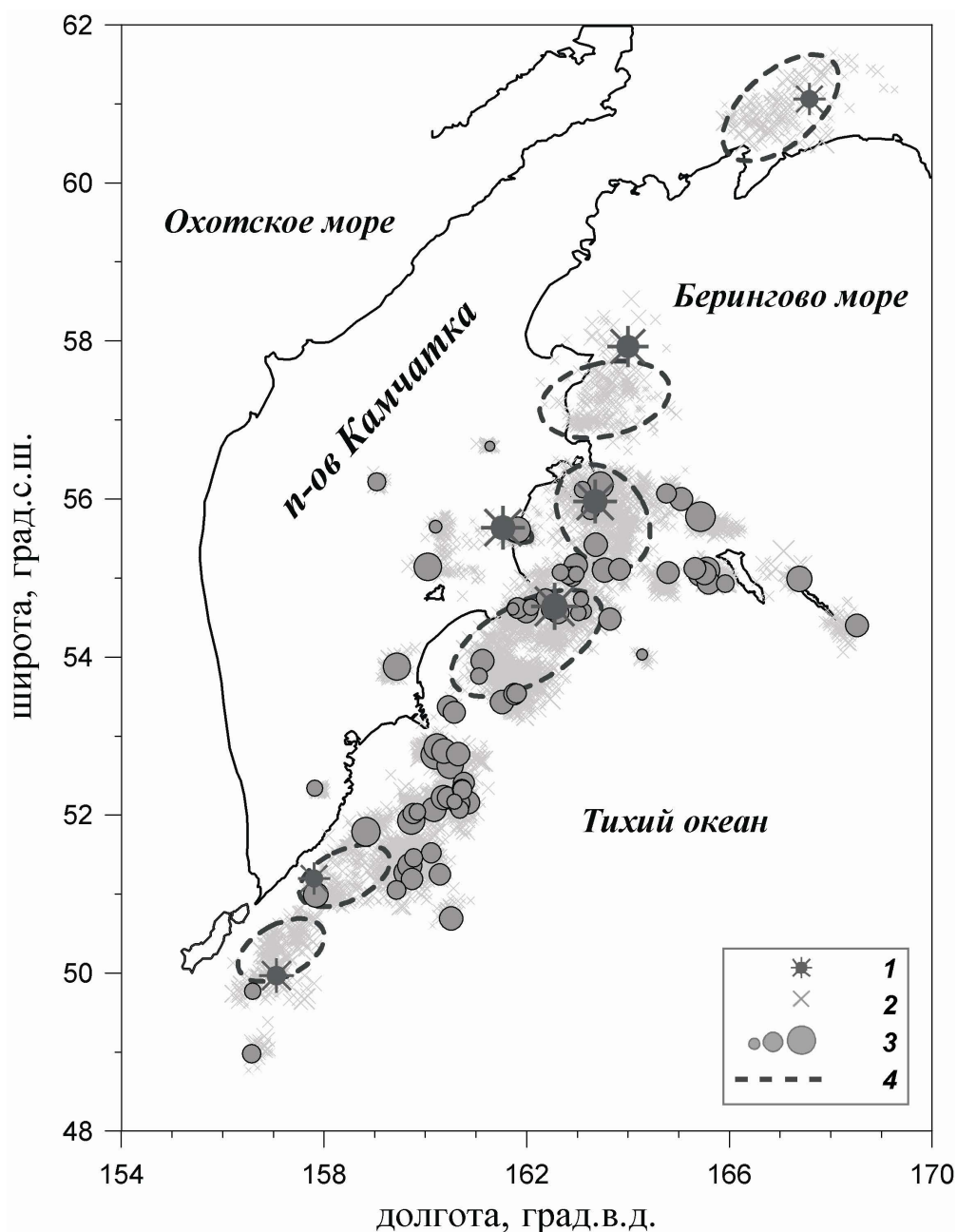


Рис. 3. Схема пространственного расположения областей афтершоковых последовательностей, эпицентров главных землетрясений и их афтершоков.

1 - эпицентр главного события с $K \geq 15.0$; 2, 3 - эпицентры афтершоков и главных событий, масштабируемых по энергетическому классу: $10.7 \leq K \leq 12.1$, $12.1 < K \leq 13.5$ и $13.5 < K \leq 14.9$; 4 - области афтершоковых последовательностей.

эмпирическая функции распределения Z (рис. 4). Определено максимальное расстояние между ними (D_n). Вычислена процентная точка статистики \tilde{D}_n , независимая от объема выборки N :

$$\tilde{D}_n = D_n \cdot \left(\sqrt{N} + 0.12 - \frac{0.11}{\sqrt{N}} \right).$$

Далее по таблице критических значений статистик Стефенса (Кобзарь, 2006) определен соответствующий уровень значимости $\tilde{\alpha}$, т. е. вероятность, с которой нулевая гипотеза является верной.

Во всех трех случаях эмпирические функции

распределения Z не совпадают с теоретическими и отстоят от них на следующих максимальных расстояниях:

1) «афтершоковая последовательность – фоновая сейсмичность»: $D_{100} = 0.25$ при $Z = -1.53$, $D_{50} = 0.15$ при $Z = -1.40$, $D_{25} = 0.11$ при $Z = -1.37$;

2) «общая сейсмичность – фоновая сейсмичность»: $D_{100} = 0.33$ при $Z = 0.27$, $D_{50} = 0.20$ при $Z = 0.52$, $D_{25} = 0.20$ при $Z = -0.18$;

3) «общая сейсмичность – афтершоковая последовательность»: $D_{100} = 0.17$ при $Z = 1.38$, $D_{50} = 0.15$ при $Z = -1.11$, $D_{25} = 0.14$ при $Z = -0.05$.

Таблица 3. Значения наклонов графика повторяемости γ и их среднеквадратичные ошибки σ_γ .

$N \geq 100$				афтершоки		фон		весь каталог	
Дата	Время (ч, мин., с)			γ_{aft}	σ_γ	$\gamma_{фон}$	σ_γ	$\gamma_{весь}$	σ_γ
21.01.1969	23	12	7.8	0.466	0.032	0.441	0.036	0.422	0.021
22.11.1969	23	9	31.5	0.467	0.028			0.507	0.030
15.12.1971	8	29	55	0.397	0.015	0.503	0.012	0.469	0.009
28.02.1973	6	37	49.4	0.299	0.019	0.398	0.011	0.386	0.010
02.07.1975	7	34	19.5	1.185	0.114			0.833	0.066
06.01.1976	22	17	43.1	0.312	0.020	0.361	0.018	0.352	0.010
02.03.1978	14	34	56.7	0.428	0.036	0.404	0.047	0.417	0.028
23.01.1980	2	34	10.4	0.359	0.024	0.373	0.023	0.364	0.012
13.03.1983	10	6	10.4	0.705	0.061			0.656	0.053
17.08.1983	10	55	55.5	0.394	0.029	0.393	0.035	0.400	0.022
28.12.1984	10	37	53.6	0.419	0.036	0.494	0.034	0.478	0.023
02.03.1992	12	29	38.5	0.491	0.042	0.405	0.020	0.412	0.016
08.06.1993	13	3	37	0.500	0.031	0.478	0.015	0.475	0.013
01.01.1996	9	57	45.8	0.543	0.026			0.537	0.025
21.06.1996*	13	57	5.6	0.503	0.032	0.462	0.031	0.455	0.019
05.12.1997	11	26	51	0.353	0.009	0.544	0.008	0.487	0.006
26.11.1999	15	57	33.8	0.418	0.031	0.339	0.029	0.339	0.016
08.10.2001*	18	20	37.5	0.499	0.042	0.478	0.024	0.492	0.020
15.03.2003	19	41	24.3	0.357	0.034	0.387	0.031	0.385	0.015
05.12.2003	21	26	14.1	0.443	0.040	0.510	0.050	0.470	0.032
20.04.2006	23	24	55.5	0.326	0.027			0.289	0.023

Примечание. Расчет произведен для каждой афтершоковой последовательности (γ_{aft} и σ_γ), фоновой сейсмичности ($\gamma_{фон}$ и σ_γ) и событий всего каталога ($\gamma_{весь}$ и σ_γ) в пределах пространственных областей афтершоков. * отмечены афтершоковые последовательности, в области которых уровень надежной регистрации составляет $K > 8.5$; серым цветом выделены даты главных событий афтершоковых последовательностей, в области которых очень низкая фоновая сейсмичность.

Полученные уровни значимости b для наглядности представлены в виде табл. 5.

Анализируя значения b , можно выделить минимальный уровень значимости $b = 0.010$, полученный при сравнении общей сейсмичности с фоновой для выборки $N \geq 25$. Это означает, что лишь с вероятностью 1% можно считать равными наклоны графика повторяемости общей сейсмичности и фона. Можно также отметить, что наибольшее различие наклонов по всем выборкам относится к случаю «общая сейсмичность – фоновая сейсмичность».

Таким образом, нулевые гипотезы, принятые для трех случаев, отклоняются по соответствующим уровням значимости. Следовательно, характеризуя фоновую сейсмичность с помощью величины наклона графика повторяемости, рассчитанной по всем землетрясениям, будут получены искаженные данные.

Для средней оценки искажений, вносимых афтершоками в окончательный результат расчета параметра γ , использовалась средневзвешенная разность Δ_γ :

$$\Delta_\gamma = \frac{\sum \Delta\gamma_i N_i}{\sum N_i}$$

Полученные значения для всех случаев и соответствующих им выборок сведены в таблицу 6.

Откуда видно, что различия достигают 0.08, что составляет порядка 10% от величины γ . Это является основанием для удаления афтершоков из каталога.

ВЫВОДЫ

Получены значения наклонов графика повторяемости афтершоков, фоновых событий и общей сейсмичности в пределах области каждой афтершоковой последовательности, рассматриваемой в работе.

В результате сравнения значений наклонов графика повторяемости для пар (γ_{aft} , $\gamma_{фон}$), ($\gamma_{весь}$, $\gamma_{фон}$) и ($\gamma_{весь}$, γ_{aft}), используя нормированную разность Z и критерий Колмогорова-Смирнова, получено статистически значимое различие между ними.

Обоснована необходимость удаления афтер-

Таблица 4. Значения параметров $\Delta\gamma$, $\sigma_{\Delta\gamma}$, Z .

Дата	Время (ч, мин., с)			I			II			III		
				$\Delta\gamma$	$\sigma_{\Delta\gamma}$	Z	$\Delta\gamma$	$\sigma_{\Delta\gamma}$	Z	$\Delta\gamma$	$\sigma_{\Delta\gamma}$	Z
21.01.1969	23	12	7.8	0.02	0.05	0.52	-0.02	0.04	-0.46	-0.04	0.04	-1.16
15.12.1971	8	29	55.0	-0.11	0.02	-5.37	-0.03	0.02	-2.25	0.07	0.02	4.05
28.02.1973	6	37	49.4	-0.10	0.02	-4.58	-0.01	0.01	-0.87	0.09	0.02	4.10
06.01.1976	22	17	43.1	-0.05	0.03	-1.80	-0.01	0.02	-0.42	0.04	0.02	1.76
02.03.1978	14	34	56.7	0.02	0.06	0.41	0.01	0.05	0.23	-0.01	0.05	-0.25
23.01.1980	2	34	10.4	-0.01	0.03	-0.44	-0.01	0.03	-0.36	0.01	0.03	0.20
17.08.1983	10	55	55.5	0.00	0.05	0.03	0.01	0.04	0.16	0.01	0.04	0.15
28.12.1984	10	37	53.6	-0.08	0.05	-1.53	-0.02	0.04	-0.41	0.06	0.04	1.38
02.03.1992	12	29	38.5	0.09	0.05	1.87	0.01	0.03	0.27	-0.08	0.04	-1.77
08.06.1993	13	3	37.0	0.02	0.03	0.62	0.00	0.02	-0.18	-0.02	0.03	-0.74
21.06.1996*	13	57	5.6	0.04	0.04	0.91	-0.01	0.04	-0.19	-0.05	0.04	-1.27
05.12.1997	11	26	51.0	-0.19	0.01	-16.3	-0.06	0.01	-5.86	0.13	0.01	12.7
26.11.1999	15	57	33.8	0.08	0.04	1.85	0.00	0.03	-0.01	-0.08	0.04	-2.26
08.10.2001*	18	20	37.5	0.02	0.05	0.42	0.01	0.03	0.45	-0.01	0.05	-0.14
15.03.2003	19	41	24.3	-0.03	0.05	-0.64	0.00	0.03	-0.05	0.03	0.04	0.75
05.12.2003	21	26	14.1	-0.07	0.06	-1.05	-0.04	0.06	-0.67	0.03	0.05	0.53

Примечание: I - "афтершоковая последовательность - фоновая сейсмичность"; II - "общая сейсмичность - фоновая сейсмичность"; III - "общая сейсмичность - афтершоковая последовательность".

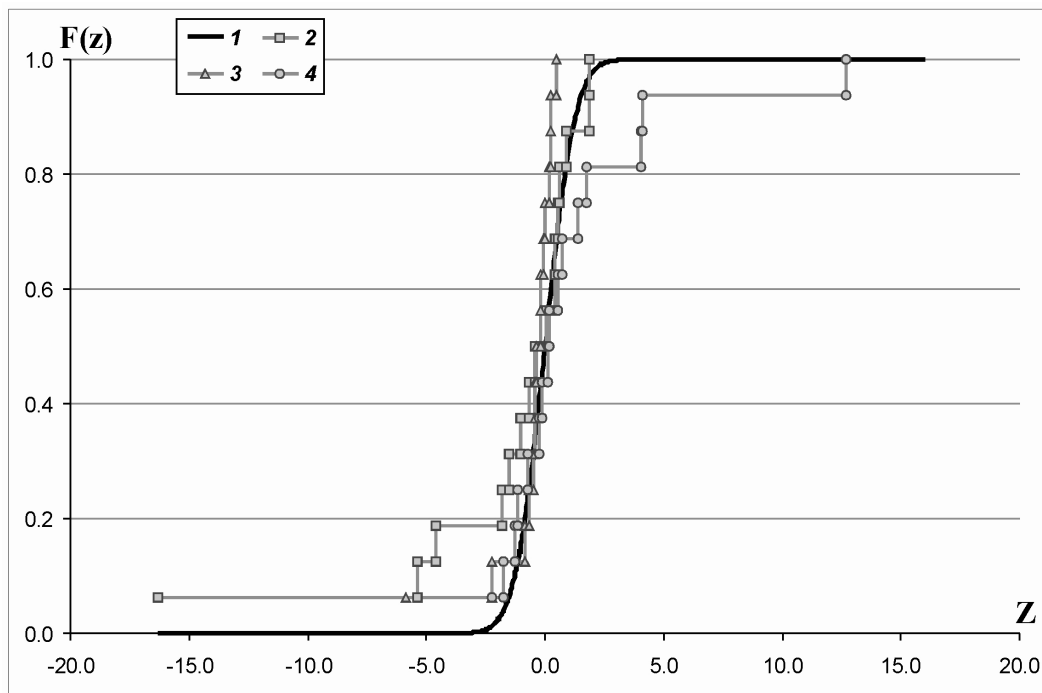


Рис. 4. Функции распределения параметра Z : 1 – теоретическая функция нормального распределения $N(0,1)$; Эмпирические функции распределения для случаев: 2 – «афтершоковая последовательность – фоновая сейсмичность»; 3 – «общая сейсмичность – фоновая сейсмичность»; 4 – «общая сейсмичность – афтершоковая последовательность».

Таблица 5. Уровни значимости β .

H_0	Объем выборки		
	$N \geq 100$	$N \geq 50$	$N \geq 25$
$\gamma_{aft} = \gamma_{фон}$	0.10	0.15	0.10
$\gamma_{весь} = \gamma_{фон}$	0.025	0.050	0.010
$\gamma_{весь} = \gamma_{aft}$	0.15	0.15	0.050

Таблица 6. Значения средневзвешенных разностей $\Delta\gamma$.

$\Delta\gamma$	Объем выборки		
	$N \geq 100$	$N \geq 50$	$N \geq 25$
$\gamma_{aft} - \gamma_{фон}$	-0.080	-0.035	-0.029
$\gamma_{весь} - \gamma_{фон}$	-0.027	-0.011	-0.014
$\gamma_{весь} - \gamma_{aft}$	0.053	0.024	0.016

шоковых последовательностей из каталога землетрясений при расчете величины наклона графика повторяемости для характеристики фоновой сейсмичности.

Список литературы

- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки // Отв. ред. Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 11-42.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. М: Наука, 2006. 254 с.
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 813 с.
- Кулдорф Г. Вопросы теории оценивания. М.: Наука, 1966. 176 с.
- Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология. Вып. 24). М.: Наука, 1991. С. 19-50.
- Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М: Наука, 1969. 511 с.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Aki K. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits // Bull. Earthquake Res. Ins. 1965. V. 43. P. 237-23.
- Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton, 1954. 310 p.

DIFFERENCE OF THE RECURRENCE GRAPH SLOPE FOR INDEPENDENT EARTHQUAKES AND AFTERSHOCK SEQUENCES

A.A. Konovalova^{1, 2}, V.A. Saltykov^{1, 2}

¹Kamchatka Vitus Bering State University,

683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya Street, 4

²Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,

683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd., 9; e-mail: KonovalovAnna@mail.ru

In work necessity of aftershock sequences removal from the catalogue of earthquakes at estimation of the recurrence graph slope γ -value is justified. Calculations were made at several thresholds of minimal number of used earthquakes $N = 100, 50$ and 25 for all earthquakes from the catalogue (γ_{all}), for the grouped earthquakes (namely, aftershocks) - γ_{aft} and for background events (γ_{bckgr}) in the spatial area of aftershock sequences. Z -parameter (normalized difference) and Kolmogorov-Smirnov's criterion were used for comparison of the received γ_{aft} -value with γ_{bckgr} -value (γ_{all} with γ_{bckgr} and γ_{all} with γ_{aft}) and for check of a H_0 -hypothesis about equality of these values. Z -distribution analysis shows statistically significant distinction of considered values. The received significance levels prove necessity of aftershock sequences removal from the catalogue of earthquakes at calculation of γ -value as parameter of seismicity.